

## 중부 영남육괴 김천일대 선캠브리아기 편마암의 저어콘 화학연대

이호선\* · 송용선 · 박계현

부경대학교 환경지질학과

### Zircon chemical age of the Precambrian gneisses from Gimcheon area in the central Yeongnam massif, Korea

Ho-Sun Lee\*, Yong-Sun Song and Kye-Hun Park

Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

**요약:** 중부 영남육괴 김천일대는 대부분 화강 편마암과 그에 협재된 흑운모 편마암이 포획암 내지 잔류암의 형태로 산출된다. 이 지역 선캠브리아기의 기저지각 발달사를 이해하기 위해서는 절대연대자료가 필수적이나 그 자료가 부족한 실정이고, 기존의 연대자료 또한 야외산상과 일치하지 않기 때문에 저어콘에 대한 화학연대 측정을 실시하였다. 측정결과 구해진 화강 편마암의  $1970 \pm 78(1\sigma)$ Ma와 흑운모 편마암의 등근 저어콘의 외각부와 길쭉한 저어콘에서 각각 얻어진  $1814 \pm 77(1\sigma)$ Ma 및  $1973 \pm 97(1\sigma)$ Ma 연대는 화강암질 마그마의 관입과 이에 의한 변성작용을 나타내는 것으로 판단된다. 그리고 흑운모 편마암의 등근 저어콘 중심부의 누대들이 보여주는  $2954 \pm 158(1\sigma)$ Ma,  $2440 \pm 58(1\sigma)$ Ma,  $2219 \pm 36(1\sigma)$ Ma 연대들은 흑운모 편마암의 변성작용 이전의 여러 지질사건들을 반영한 것이다. 그리고 두 편마암의 저어콘 모두에서 나타나는 1450~1630 Ma 연대는 화강 편마암과 흑운모 편마암이 함께 겪은 후기 변성작용의 시기로 생각된다. 이 연구에서 사용한 것과 같은  $1 \mu\text{m}$ 의 분석직경을 갖는 전자현미분석법에 의한 저어콘 화학연대 측정은 우수한 공간분해능의 결과로 복잡한 성장역사를 갖는 저어콘으로부터 지질학적 사건들을 구분하는데 아주 유용한 연대측정 수단으로 판단된다.

**핵심어:** 저어콘, 화학연대, 화강 편마암, 흑운모 편마암, 영남육괴

**Abstract:** In Gimcheon area of the central Yeongnam massif granite gneiss occurs with intercalated biotite gneiss as xenolith or restite. In order to understand the evolution of the central Yeongnam massif, it is essential to have absolute age information, but not many age data are available yet. Furthermore the previous age determinations from the study area are not compatible with the outcrop relationship. In this study we determined chemical ages from the zircon grains. We obtained ages of  $1970 \pm 78(1\sigma)$ Ma from the granite gneiss,  $1814 \pm 77(1\sigma)$ Ma from the outer rim of a rounded zircon and  $1973 \pm 97(1\sigma)$ Ma from a longish zircon, both from the biotite gneiss. These ages seem to indicate the timing of granitic magma intrusion and subsequent metamorphism. Ages of  $2954 \pm 158(1\sigma)$ Ma,  $2440 \pm 58(1\sigma)$ Ma, and  $2219 \pm 36(1\sigma)$ Ma obtained from zoned core of the rounded zircon grain from the biotite gneiss suggest various geological events before such metamorphism of the biotite gneiss. Ages in the range of 1450~1670 Ma observed in zircons of both gneisses suggest later metamorphism that the granite gneiss and the biotite gneiss experienced together. The chemical age determination by electron probe micro-analyzer of this study utilized  $1 \mu\text{m}$  beam diameter and it seems to be a very useful age determination from the zircons with complex growth history because of superior spatial resolution.

**Key words:** zircon, chemical age, granite gneiss, biotite gneiss, Yeongnam massif.

\*Corresponding author: Tel. 82-51-620-6236, E-mail. geosun@mail1.pknu.ac.kr

## 서 론

남한의 선캠프브리아 기반을 이루는 영남육괴와 경기육괴는 최고 백립암상에 이르는 변성작용을 겪은 것으로 보고되고 있다(이광진과 조문섭, 1992; 조문섭과 김종욱, 1993; 송용선과 류호정, 1994; 조운호 외, 1996; Lee *et al.*, 1997; 권용완 외, 1997, 1999; 류호정, 2001).

지각의 변천사를 연구하기 위해서는 특히 동위원소를 이용한 지구 연대학적 연구가 필수적이나 아직 절대연대 측정 자료 수는 매우 부족한 실정이다. 경기육괴의 경우 최근 보고되고 있는 저어콘 연대는 최소 8 억년에서 최고 29억년까지 다양하며(박계현과 정창식, 1993; Turek and Kim, 1996; Lee *et al.*, 1997; Kim *et al.*, 1999; 조동룡 외, 1998; 조문섭 외, 1999; 권용완 외, 2001; 조문섭, 2001), 이는 경기육괴의 생성역사가 과거에 생각했던 것과는 달리 상당히 복잡한 변천사를 겪어왔음을 나타내며, 경기육괴 기저지각사를 이해하기 위해 보다 많은 연대측정자료가 필요할 것으로 생각된다. 영남육괴의 경우에도 여러 연대자료가 보고되고 있지만, 경기육괴와는 달리 측정된 연대의 분포가 대부분 17억년에서 22억년으로 비교적 제한된 범위이다(윤현수, 1991; 박계현 외, 1993; 권성택 외, 1995; Turek and Kim, 1996; 김정민 외, 2000; 박계현 외, 2001). 이러한 측정된 연대범위의 차이가 나타나는 것은 영남육괴가 경기육괴와는 다른 지각진화사를 거친 것이기 때문인지는 좀 더 연구가 필요할 것으로 생각된다.

한편, 연구대상지역인 중부 영남육괴 김천일대의 경우는 영남육괴 다른 지역에 비해서 보다 젊은 연대가 보고되고 있다. 미그마타이트질 편마암의 Rb-Sr 전암 연대가  $1608 \pm 100$  Ma,  $402 \pm 10$  Ma로 알려져 있고(Choo and Kim, 1985), 화강 편마암과 흑운모 편마암의 Sm-Nd 전암연대도 각각  $1699 \pm 591$  Ma,  $1047 \pm 69$  Ma(Lee *et al.*, 1992)로 발표되었다. 그러나 Lee *et al.* (1992)의 연대 측정결과는 Sm/Nd 비율의 변화폭이 매우 좁고 분석자료가 등시선 주위에 크게 분산되어 연대로의 해석이 어렵다고 볼 수 있으며, 더욱이 화강 편마암 내에 포획되어 나타나는 흑운모 편마암이 오히려 더 후기의 연대 값을 갖기 때문에 야외산상과 일치하지 않는다. 김천지역의 고도 변성작용을 받은 기저지각에 대한 발달사를 보다 확실히 규명하기 위해서는 Sm/Nd 혹은 Rb/Sr 측정법 이외의 절대연대측정 자료가 필수적이다.

이러한 절대연대측정 방법으로는 암석의 고유 생성

연대를 밝힐 수 있는 저어콘에 대한 화학연대측정법(Suzuki and Adachi, 1991a, b, 1994; Kim *et al.*, 1997; Robb *et al.*, 1999; 이석훈, 2001)이 효과적일 것으로 판단된다. 특히, 폐쇄온도가 높은 저어콘은 고도의 화성활동과 변성작용 동안 잔류 및 성장할 수 있기 때문에 복잡한 지질 역사를 밝히는데 아주 유용하다(Broun *et al.*, 1990; Vavra, 1990; Hanchar and Miller, 1993). 특히, 전자현미분석기를 이용한 화학연대 측정법은 좁은 분석직경(최소  $1 \mu\text{m}$ 까지)을 사용하기 때문에 광물 내 수  $\mu\text{m}$  규모로 발달된 누대별 연대 측정이 가능하다.

이 연구에서는 이상과 같은 장점을 갖는 저어콘에 대해 전자현미분석기를 이용한 화학연대 측정법을 적용하여 김천지역에 분포하는 화강 편마암과 흑운모 편마암의 선후관계를 재확인하고, 정량적인 절대연대 자료의 획득을 통해 영남육괴 지각발달사 연구에 기여하고자 한다.

## 일반지질 및 암석기재

영남육괴 중앙부는 선캠프브리아기 변성암류가 대부분을 차지하고 있다(Fig. 1) 선캠프브리아기 변성암류 중 준편마암류는 북동-남서 주향방향으로 북서부와 남동부 일부지역에 분포하며, 화강 편마암 및 북운모 화강 편마암, 반상변정질 편마암, 호상 편마암 등으로 구성된 화강 편마암 복합체가 지역의 대부분을 차지한다. 또한 중생대 대보조산운동에 수반된 유라기 화강암류와 백악기 말 불국사 화강암류가 이들 변성암류를 관입하며 광범위하게 분포한다(윤석규와 박병권, 1968; 박봉순과 이윤중, 1969; 원종관과 김기태, 1969; 김상욱과 이흥주, 1970; 김상욱 외, 1989).

영남육괴 북동부와 남서부 지리산 일대의 변성암류들은 상부 각섬암상에서 각섬암상 그리고 녹립석-각섬암상이 차례로 중첩된 3회의 변성작용과 최고 백립암상에 이르는 고도 변성작용을 받은 것으로 알려져 있다(이상만, 1980; 이상만 외 1981; 이상만과 김형식, 1984; Lee *et al.*, 1986; 송용선과 류호정, 1994; 송용선, 1999; 류호정, 2001). 영남육괴 중앙부 역시 각섬암상에서 백립암상에 이르는 고도의 집진 변성작용을 거쳐 각섬암상 내지 녹색 편암상의 후퇴변성작용이 중첩되었으며, 이질암의 광물군을 통해 구해진 정점 및 후퇴변성온도 및 압력조건은 각각  $600\text{-}850^\circ\text{C}$ ,  $4.5\text{-}7$  kbar 및  $500\text{-}600^\circ\text{C}$ 로 알려진 바 있다(송용선, 1986, 1989; 송용선과 이상만, 1989; 이호선, 2000).

이 연구의 대상 암체는 중부 영남육괴 전반에 걸쳐

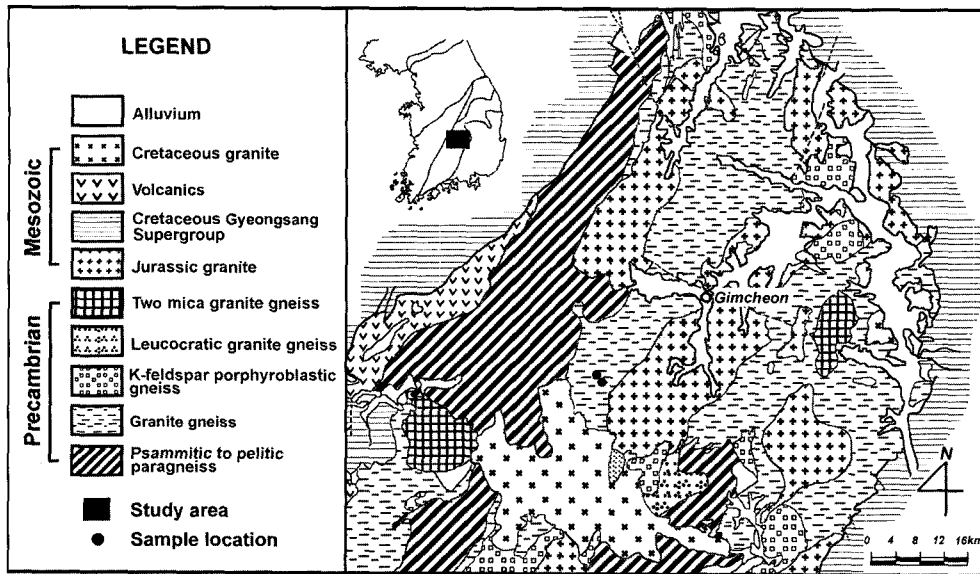


Fig. 1. Geological map of the study area in the central Yeongnam massif (Modified after Song, 1987).

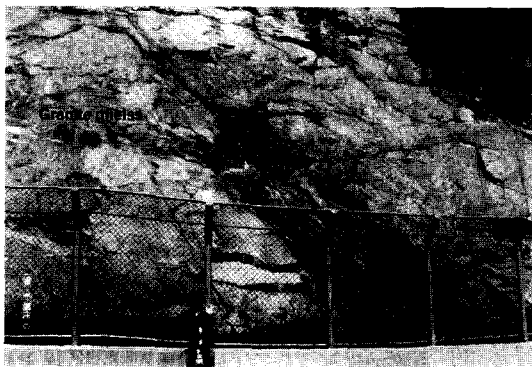


Fig. 2. Outcrop photograph of granite and biotite gneisses.

넓게 분포하고 있는 화강 편마암과 이에 포획 내지 잔류의 형태로 나타나는 흑운모 편마암으로 지질도에서 화강 편마암으로 나타낸 암체이다(Fig. 1). 흑운모 편마암은 주로 준 편마암류와 인접한 서부 지역에서 수 10 cm 내지 수 10 m 폭으로 화강 편마암 내에 협재하여 산출되고(Fig. 2) 그 규모가 작아 지질도상 분리하여 표시하지는 않았다.

**화강 편마암**

영남육괴는 최고 백립암상 정도의 고도 변성작용을 거쳤으며(송용선, 1999; 이호선, 2000), 이 지역 화강

편마암도 심하게 변형 및 미그마타이트화 되어 있다(Fig. 3a). 화강 편마암은 우백색을 띠는 중 내지 조립질로 현저한 엽리구조가 나타나고(Fig. 4a), 흔히 1~2 cm 두께의 페그마타이트 층이 엽리에 평행하거나 약간 사교하는 방향으로 발달되어 있고 소규모의 각섬암도 렌즈상으로 포획되어 산재되어 있다.

석영과 사장석 및 K-장석, 흑운모가 주구성 광물이며 부수광물로는 2차적인 백운모와 녹니석이 관찰된다. 대체로 후퇴변질의 흔적을 보이지 않는 세립질의 갈색 흑운모가 단속적인 방향으로 엽리를 이루고 있다. 미사장석은 간간이 안티퍼사이트 조직을 보이며 석영은 봉합선 조직이나 세립질 입자로 관찰되기도 한다(Fig. 5).

**흑운모 편마암**

고도 변성작용과 분화작용에 의해 흑운모 편마암은 일부 노두에서 화강 편마암 내에 포획 내지 잔류암(restite)의 형태로 산출된다(Fig. 3). 흑운모 편마암은 광물조성과 화학조성에서는 화강암류에 해당되나 흑운모가 다량 함유되어 있어 화강 편마암에 비해 어두운 색을 띠므로 야외에서 화강 편마암과는 쉽게 구별된다. 주로 흑운모, 석영, 사장석 및 K-장석으로 구성되어 있으며 대체로 균질한 조성을 갖는 중립 내지 조립질암으로 편마구조가 뚜렷하고, 우흑부와 규장질부가 교호되는 호상구조 또는 안구상 조직이 발달되어 있다(Fig. 4b).

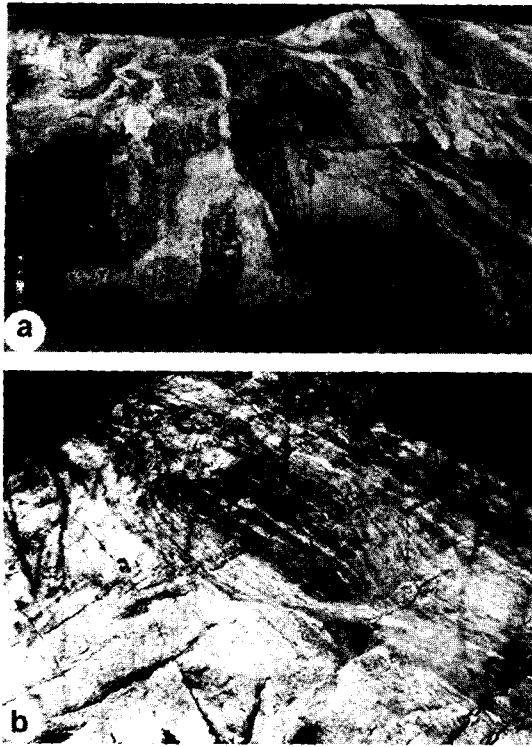


Fig. 3. Outcrop photographs showing (a) migmatized granite and biotite gneisses. (b) biotite gneiss xenolith in granite gneiss.

박편상에서, 흑운모가 방향성을 띠고있는 우흑부와 석영과 사장석 및 K-장석으로 구성된 우백부가 교대로 발달된 조결을 보인다. 주요 변성광물로는 사방휘석, 단사휘석, 석류석 및 각섬석이 관찰된다(Fig. 5). 후퇴변성작용의 영향으로 석류석 주변부는 Mg값이 낮아지는 경향을 보이고(이호선, 2000), 간혹 흑운모는 녹니석으로 변질되어 있으며 백운모는 건운모화 되어 있기도 하다. 부수광물로 인회석, 티탄철석, 저어콘 등이 나타난다.

### 저어콘 화학연대 측정

저어콘은 화강암질 암석에 흔하게 나타나며 매우 높은 폐쇄온도를 갖기 때문에 화성암과 변성암의 연대측정에 널리 활용되어 왔다. 저어콘에 대한 연대측정은 전통적으로 열이온화질량분석기를 이용한 U-Pb 법이 쓰여왔다. 그러나 분석직경 30  $\mu\text{m}$  내외의 SHRIMP (Sensitive High Resolution Ion Microprobe)에 의한 미세영역 분석결과 여러 시기에 걸쳐 성장한 복잡한 지

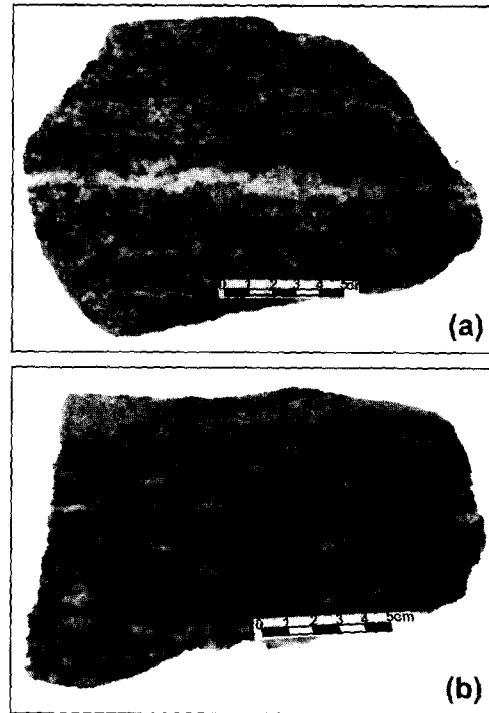


Fig. 4. Photographs showing (a) granite and (b) biotite gneisses.

질역사를 가진 저어콘도 흔한 것으로 밝혀졌다. 기존의 동위원소 분석법은 광물이 여러 차례의 지질사건을 겪으며 성장 하였더라도 광물이 가지는 평균연대만을 알아낼 수 있기 때문에 경우에 따라서는 지질학적으로 별 의미가 없는 결과를 내놓을 가능성도 있다. 이러한 경우에는 공간분해능이 우수한 기기로 미세영역에 대한 연대측정을 수행하는 것이 필수적이다.

최근에는 전자현미분석기를 이용하여 U-Th 함유 광물에 대한 연대측정 결과가 자주 보고되고 있다(Suzuki and Adachi, 1991a, b; Suzuki and Adachi, 1994; Montel *et al.*, 2000). 전자현미분석기를 이용한 U-Th-Pb 연대측정은 동위원소 조성을 분석하지 않고, 단순히 원소 함량만으로 연대를 계산하기 때문에 화학연대(chemical age) 측정법이라 부른다. 최근의 여러 논문에서 소위 CHIME(chemical Th-U-total Pb isochron method) 이라고 소개되어 있는 방법이다. 이러한 연대측정 방법의 정당성과 질차에 대해서는 이미 여러 논문에서 소개가 되어있다(Suzuki and Adachi, 1994; Montel *et al.*, 1996; Andrij *et al.*, 1997; 이석훈, 2001).

화학연대 측정법은 U이나 Th을 다량 함유한 광물내에 존재하는 Pb가 모두 U 및 Th의 붕괴에 의해 만들

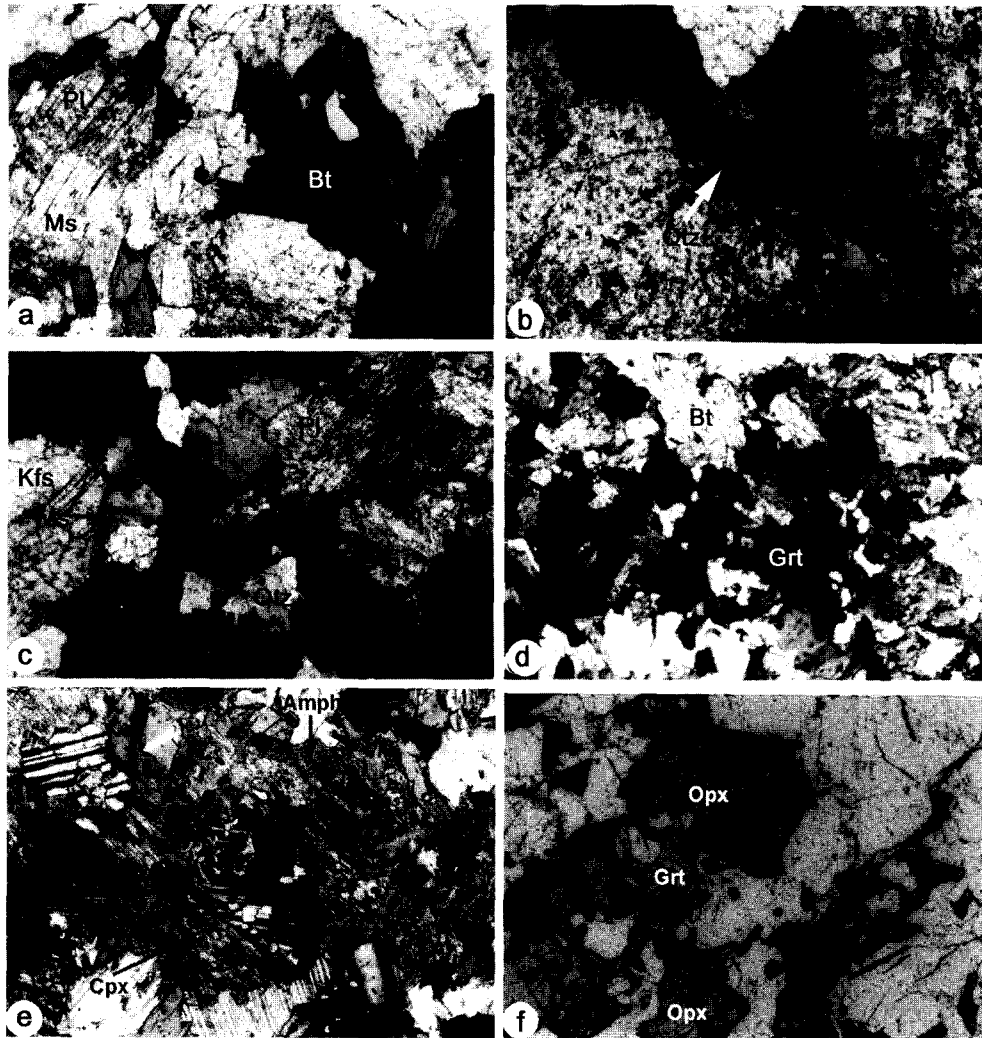


Fig. 5. Photomicrographs of granite (a, b, and c) and biotite gneisses (d: relict of garnet, e: clinopyroxene with reaction rim of amphibole and f: coexisting garnet and orthopyroxene).

어진 것이라고 가정하여 연대를 계산한다. 저어콘은 U 과 Th 두 원소를 다 포함하고 있으나 특히 U의 함유량이 높기 때문에 각 원소의 붕괴 상수를 감안하여 U\*의 환산농도를 사용하는 것이 편리하다(Suzuki and Adachi, 1991a, b; Andrij *et al.*, 1997). 동일 연대를 갖는 저어콘의 분석자료는 U\*-Pb 그림에서 선상으로 배열되어 등시선을 형성하며, 이러한 등시선이 U\*-Pb 그림에서 원점을 지나는 경우 저어콘이 U, Th 및 Pb에 대하여 폐쇄계로 거동했음을 지시한다.

화학연대 측정은 소량의 시료로도 분석이 가능하며, 측정시간이 짧고 분석이 비교적 간편한 장점이 있다.

최근 많이 보고되고 있는 화학연대 측정 연구에서는 낮은 농도의 분석을 위하여 일반적으로 5-10 μm 정도의 분석직경 사용하였으나, 이 연구에서는 분석직경 1 μm로 분석을 시도하여 훨씬 더 높은 공간분해능을 얻고자 하였다.

#### 저어콘 분리

화강 편마암과 흑운모 편마암 시료 약 2 kg씩을 암석분쇄기로 40메쉬 망체를 통과할 때까지 반복 분쇄한 뒤, 자력선별기와 팬닝을 통하여 비자성 중광물들을 모았다. 이들을 얇은 붓과 0.15 mm 비자성 핀셋을 이용

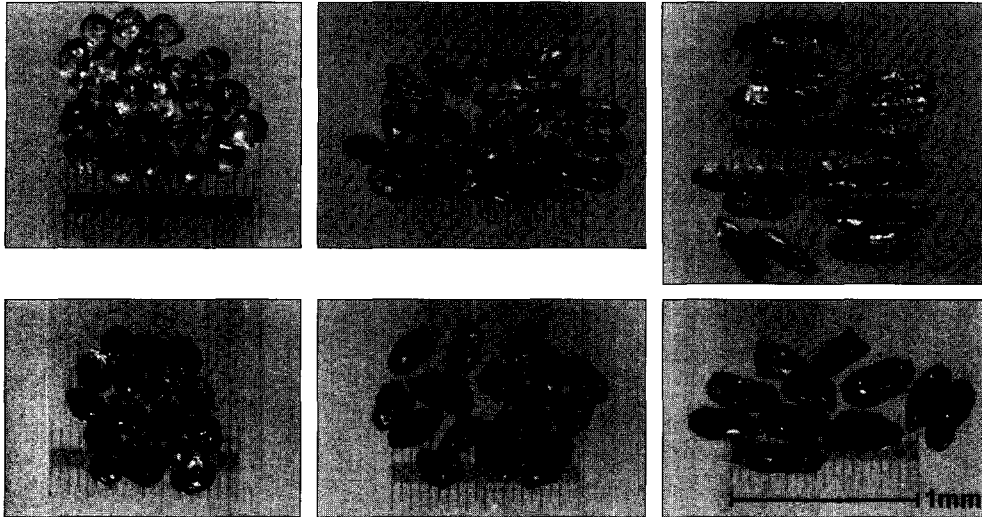


Fig. 6. Photographs of various zircon morphologies separated from the biotite gneiss.

하여 실체현미경 하에서 손으로 골라내는 작업을 통해 저어콘의 순도를 높였고, 결정형과 색깔 및 투명도차이, 그리고 입자크기별로 다시 재선별 작업을 하였다.

화강 편마암에서 보다 흑운모 편마암의 저어콘 양이 더 많았으며, 색깔은 두 시료 모두에서 밝은 노란색과 옅은 갈색 혹은 적갈색으로 산출되었다(Fig. 6). 저어콘은 옅은 갈색 내지 적갈색의 포유물을 함유하고 있으며, 노란색의 저어콘은 포유물이 거의 없다. 흑운모 편마암 보다 화강 편마암의 저어콘이 포유물을 적게 함유하는 경향을 보였다. 저어콘의 형태적인 특징으로 볼 때, 두 편마암에서 화성 및 변성기원으로 볼 수 있는 자형 입자와 퇴적기원일 수도 있는 둥근형 입자가 모두 관찰되었다. 또한 길쭉한 형태의 입자도 관찰되며 특히 화강 편마암에서 긴 형태의 저어콘이 상대적으로 많이 나타난다.

#### 전자현미분석

분리해낸 저어콘 중 입자 크기가 0.1 mm 이상인 것만을 골라내어 형태와 포유물의 유무에 따라 구분하여 연마박편을 제작한 후, 탄소코팅 처리를 거쳐 한국기초과학지원연구원의 CAMECA SX-51 EPMA로 분석을 하였다. 분석 조건은 가속전압 및 전류가 각각 15 keV와 100 nA이었으며 1  $\mu$ m의 빔 직경으로 원소 당 측정시간 300초로 설정하여 분석을 수행하였다. 각 원소당 측정오차는 5~10% 내외이며 개별 연대는  $\pm 10\%$ ( $2\sigma$ ) 이내의 상대오차 범위를 보인다(이석훈, 2001). 농도 분석에 앞서 U과 Th 등 무거운 원소들이 상대적

으로 많이 농집되어 있는 부분을 알아내어 효율적인 분석을 수행하고, 더불어 저어콘 입자의 누대구조를 살펴보기 위해 배면산란 전자 영상(back-scattered electron image) 관찰을 선행하였다.

흑운모 편마암의 둥근형 저어콘 입자(K9609B)에서는 25지점을 그리고 길쭉한 형태의 저어콘 입자(K9609A)에서는 6지점을 분석하였다(Table. 1). 화강 편마암은 자형 또는 준자형의 저어콘 중 250~500  $\mu$ m 크기의 입자 4개(K9610A-1~4)에서 7지점을, 150~250  $\mu$ m 크기의 5개 입자(K9610B-1~5)에서 8지점을 각각 분석하였다(Table. 1).

#### 분석결과 및 토의

배면산란 전자영상 관찰 결과, 화강 편마암에서는 불규칙한 경계의 중심부와 비교적 규칙적인 누대구조를 보이는 외각부를 갖는 저어콘이 자주 관찰된다. 흑운모 편마암의 경우, 길쭉한 저어콘은 누대가 균질하게 잘 발달되어 있고, 둥근 형태의 저어콘 입자는 불규칙한 경계를 갖는 중심부의 바깥으로 누대가 치밀하게 발달되어 있다(Fig. 7a, Fig. 8a).

저어콘의 U, Th, Pb 및 Y의 원소별 농도(Table. 1, K9610B에 대해서는 Y 분석하지 않음)를 살펴보면 흑운모 편마암과 화강 편마암이 뚜렷한 차이를 보인다. 흑운모 편마암의 포유물을 많이 갖는 적갈색 저어콘 입자(K9609B)는 대부분의 분석지점에서, 분석된 원소들 모두 다 화강 편마암의 저어콘에 비해 상대적으로 높은 함량을 나타낸다. 특히, Th과 Y은 화강 편마암의

**Table 1. EPMA analyses on zircon grains from granite and biotite gneisses of Gimcheon area.**

Rock Type	Sample	Spot #	U (wt.%)	Th (wt.%)	Pb (wt.%)	Y (wt.%)	U* (wt.%)	T (Ma)	
Granite Gneiss	K9610A-1	35	0.1004	nd	0.0336	0.0798	0.1004	1927	
		36	0.0846	0.0023	0.0313	0.0790	0.0852	2072	
	K9610A-2	39	0.1458	0.0096	0.0486	0.0206	0.1484	1895	
		40	0.1402	0.0064	0.0494	0.0658	0.1419	1987	
		<b>Average</b>	<b>0.1025</b>	<b>0.0062</b>	<b>0.0362</b>	<b>0.0613</b>	<b>0.1038</b>	<b>1970 ± 78</b>	
	K9610A-3	41	0.2140	0.0020	0.0583	0.0167	0.2145	1629	
		42	0.0413	0.0064	0.0179	nd	0.0429	2280	
	K9610A-4	37	0.0583	nd	0.0147	0.0658	0.0583	1531	
	K9610B-1	1-1	0.7487	0.2475	0.0333	ND	0.9357	281	
		1-2	0.1667	0.0473	0.0157	ND	0.2052	586	
		1-3	0.1992	0.0423	0.0073	ND	0.2408	241	
		K9610B-2	2-1	0.1372	0.0519	0.0084	ND	0.1736	379
			K9610B-3	3-1	0.4773	0.0263	0.0145	ND	0.5507
		K9610B-4	4-1	0.1642	0.0379	0.0049	ND	0.1996	196
			4-2	0.1301	0.0305	0.0080	ND	0.1581	395
K9610B-5		5-1	0.1776	0.0931	0.0130	ND	0.2335	433	
		<b>Average</b>	<b>0.2751</b>	<b>0.0721</b>	<b>0.0131</b>		<b>0.3372</b>	<b>340 ± 133</b>	
K9609A (longish grain)		28	0.3263	0.0322	0.1242	0.4824	0.3347	2088	
	29	0.6621	0.0808	0.2124	0.6213	0.6838	1816		
	30	0.4404	0.0649	0.1536	0.4340	0.4576	1932		
	31	0.7237	0.0917	0.2542	0.7314	0.7480	1951		
	32	1.1005	0.0445	0.4034	0.7623	1.1121	2052		
	33	0.5349	0.0368	0.1914	0.0962	0.5446	2003		
	<b>Average</b>	<b>0.6313</b>	<b>0.0585</b>	<b>0.2232</b>	<b>0.5213</b>	<b>0.6468</b>	<b>1973 ± 97</b>		
	K9609B (rounded grain)	7	0.0361	0.0413	0.0279	0.1197	0.0456	2969	
		9	0.0485	0.0282	0.0315	0.1157	0.0551	2841	
		10	0.1985	0.1574	0.1434	0.2608	0.2346	2966	
		11	0.0909	0.0655	0.0777	0.1731	0.1144	3165	
		19	0.0412	0.0420	0.0340	0.1146	0.0505	3147	
		20	0.1228	0.1120	0.0877	0.4382	0.1491	2824	
		23	0.1214	0.0948	0.0791	0.1901	0.2523	2769	
		<b>Average</b>	<b>0.0942</b>	<b>0.0773</b>	<b>0.0688</b>	<b>0.2017</b>	<b>0.1288</b>	<b>2954 ± 158</b>	
K9609B (rounded grain)		1	0.3417	0.0186	0.1579	0.1949	0.3463	2452	
		13	0.4311	0.0139	0.2026	0.1593	0.4345	2472	
		21	0.1535	0.0068	0.0744	0.0734	0.1491	2512	
		24	0.1848	0.0039	0.0832	0.0718	0.1439	2402	
		25	0.2031	0.0185	0.0911	0.0665	0.2077	2365	
		<b>Average</b>	<b>0.2628</b>	<b>0.0123</b>	<b>0.1218</b>	<b>0.1132</b>	<b>0.2563</b>	<b>2440 ± 58</b>	
		2	0.4017	0.0225	0.1646	0.1399	0.4075	2225	
	6	0.5345	0.0178	0.2211	0.2544	0.5390	2252		
	12	0.5333	0.0302	0.2125	0.2522	0.5411	2180		
	<b>Average</b>	<b>0.4898</b>	<b>0.0235</b>	<b>0.1994</b>	<b>0.2155</b>	<b>0.4959</b>	<b>2219 ± 36</b>		
	3	0.3605	0.0218	0.1173	0.1223	0.3663	1862		
	5	0.3830	0.0153	0.1140	0.2482	0.3871	1740		
	14	0.3545	0.0374	0.1060	0.2657	0.3647	1720		
	15	0.0703	0.0060	0.0223	0.0628	0.0719	1814		
	16	0.1314	0.0189	0.0457	0.1343	0.1364	1928		
22	0.2471	0.0195	0.0786	0.1944	0.2523	1821			
<b>Average</b>	<b>0.2578</b>	<b>0.0198</b>	<b>0.0807</b>	<b>0.1713</b>	<b>0.2631</b>	<b>1814 ± 77</b>			
26	0.2412	0.0252	0.0589	0.1689	0.2482	1454			
4 †	0.1755	0.0048	0.0428	0.0658	0.1768	1479			
17 †	0.0965	0.0223	0.0229	0.1317	0.1028	1387			
18 †	0.3576	0.0332	0.1962	0.3202	0.3655	2724			

U\*: measured U(abundance) plus equivalent of measured Th(abundance).  
 † : discordant ages. nd: not detected. ND: not determined.

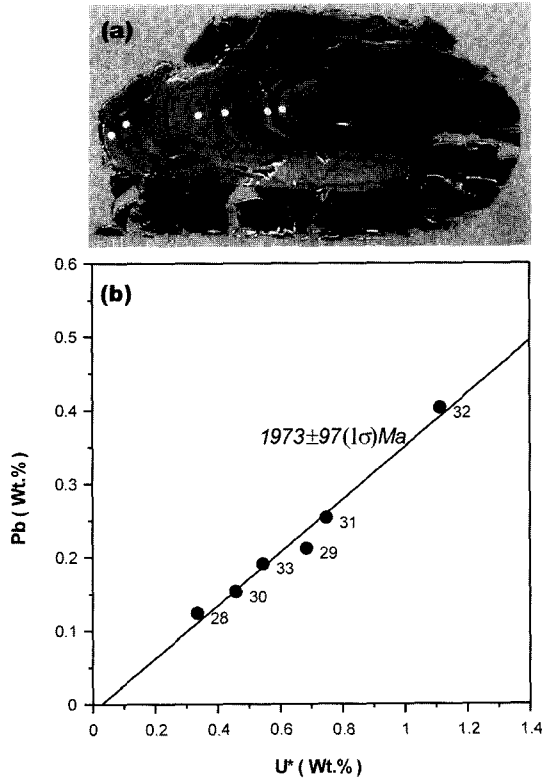


Fig. 7. Pb vs. U\* diagram for a longish zircon from the biotite gneiss. (a) cross section showing analyzed 6 spots. (b) plots of Pb vs. U\* diagram showing average age.

열은 갈색 저어콘들에서 매우 낮은 값으로 분석되었다. 이러한 농도 차이는 저어콘이 포함된 두 암석의 미량 원소 함량(Th과 Y함량이 화강 편마암에서는 각각 7.4 ppm과 6.4 ppm, 흑운모 편마암 12.1 ppm과 20.3 ppm)의 차이를 반영한다(이호선, 2000).

화강 편마암의 경우 250~500 μm의 크기를 갖는 저어콘의 분석농도 값으로 계산된 연대를 살펴보면, K9610A-1은 1927Ma과 2072Ma, K9610A-2는 1895 Ma와 1987 Ma로써 이들에 대한 평균연대를 구하면 1970 ± 78(1σ)Ma(Table 1, Fig. 9)이다. K9610A-3는 1629 Ma과 2280 Ma로 상당히 차이가 나는 값을 보여주며, K9610A-4는 1531 Ma로 계산되었다. 한편, 포유물이 없고 열은 황색을 띠는 150~250 μm 크기의 저어콘 5개 입자(K9610B-1~5)로부터 구해진 8지점의 연대는 196~586 Ma의 범위를 가지며 평균 340 ± 133(1σ)Ma의 연대를 갖는 것으로 분석되었다. 흑운모

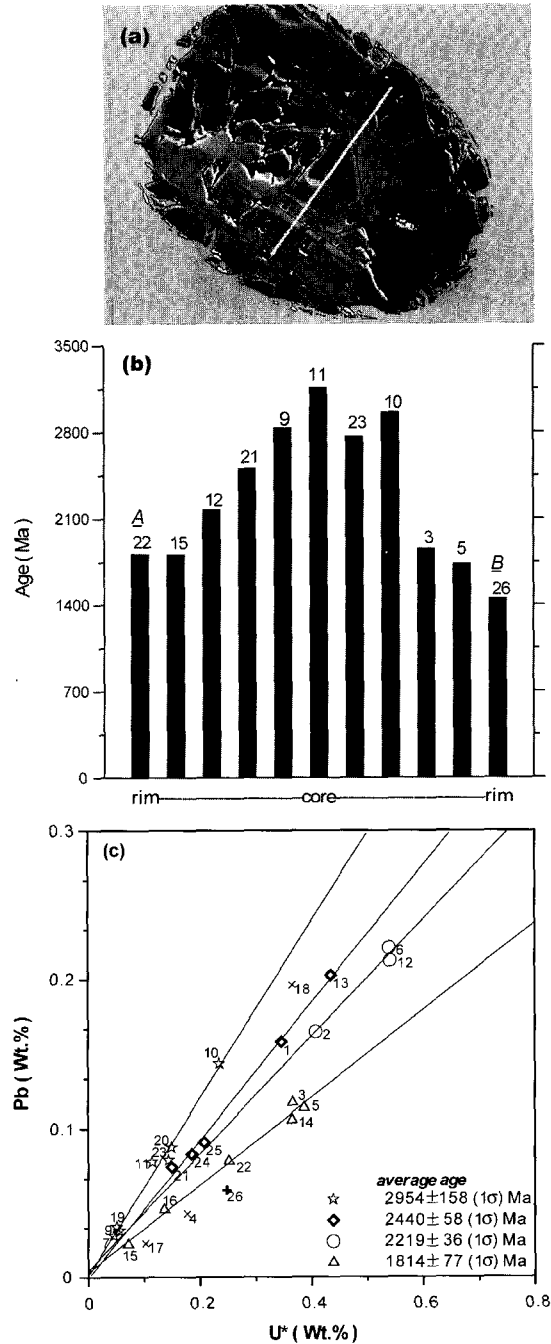
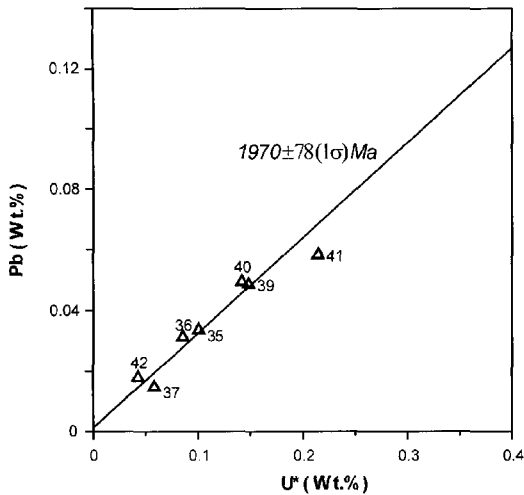


Fig. 8. Pb vs. U\* diagram for a rounded single zircon grain from the biotite gneiss. (a) cross section showing analyzed 25 spots. (b) distribution of chemical ages calculated using the total Pb method. (c) plots of Pb vs. U\* diagram showing average age.





**Fig. 9.** Pb vs. U\* diagram for the zircons from granite gneiss. Average age of  $1970 \pm 78(1\sigma)$ Ma is calculate from four points (35, 36, 39, 40).

편마암의 경우 둥근형과 길쭉한 형태의 두 저어콘 입자에 대하여 분석하였다. 길쭉한 형태의 저어콘(K9609A)에 대한 6지점의 분석결과 최소 1816 Ma, 최대 2088 Ma의 값을 얻었으며, 평균연대는  $1973 \pm 97(1\sigma)$ Ma로 화강 편마암의 K9610A-1과 K9610A-2의 평균연대와 같은 연대를 나타낸다(Table 1, Fig. 7b). 한편, 둥근 저어콘 입자(K9609B)에 대한 25지점의 분석결과를 보면, 누대별로 상당한 차이를 보이는 연대가 나타났다. 불규칙한 경계를 보이는 입자중심부 7지점의 연대는 최소 2768 Ma, 최대 3165 Ma이며, 이들의 평균연대는  $2954 \pm 158(1\sigma)$ Ma이다. 바로 바깥부분의 비교적 규칙적인 누대에서는 5지점의 분석으로 평균  $2442 \pm 58(1s)$ Ma의 연대를 얻었다. 이 구역을 둘러싸는 배면산란전자영상에서 밝게 보이는 누대의 3지점 평균연대는  $2219 \pm 36(1\sigma)$ Ma이다. 보다 더 바깥쪽 누대의 6지점 분석 평균 연대는  $1814 \pm 77(1\sigma)$ Ma로 나타나며, 이 연대는 화강 편마암의 K9610A-1과 K9610A-2의 저어콘 평균연대와 흑운모 편마암의 길쭉한 저어콘(K9609A)에서 얻어진 연대와 오차범위 내에서 유사하다. 최외각 누대의 1지점 분석에서는 1450 Ma 연대가 구해졌다. 전체적으로 보면 중심부에서 외각으로 가면서 점차적으로 젊어지는 연대분포를 보이지만, 25지점 분석 중 3지점에서는 이러한 일반적인 경향과는 다른 연대가 계산되었다(Table 1, Fig. 8).

이상의 연대 측정 결과를 연대순으로 살펴보면, 화강 편마암에서의 최고 연대가 2280 Ma인 것에 반해,

흑운모 편마암의 적갈색 저어콘은 중심부 연대가 최고 3165 Ma이고 누대별 평균 연대는 2954 Ma, 2440 Ma, 2219 Ma로 시생대에서 원생대 초에 걸친 다양한 저어콘의 성장역사를 보여준다. 화강 편마암의 저어콘의 분석점 수가 적긴 하지만 7지점 분석 중 4지점이  $1970 \pm 78$  Ma의 평균연대로 계산되는 비슷한 값으로 나타나고, 흑운모 편마암의 길쭉한 저어콘(K9609A)의 평균연대와 동일한  $1973 \pm 97$  Ma이며, 둥근 저어콘(K9609B) 역시 외각부에서 이와 비슷한  $1814 \pm 77$  Ma의 연대가 나타나는 것은, 이 연대가 현재는 화강 편마암으로 변성된 화강암질 마그마의 관입연대이며 이 시기에 흑운모 편마암이 변성된 결과로 해석할 수 있다. 이러한 결과는 Lee *et al.*(1992)이 Sm-Nd 전암 분석자료로부터 화강 편마암은  $1699 \pm 591$  Ma, 흑운모 편마암은  $1047 \pm 69$  Ma의 연대를 갖는다고 보고하여 아외산상과는 상반된 결과를 보여주었던 것과는 달리, 두 암체의 산출 특성과도 잘 일치하는 결과를 보여준다.

화강 편마암의 저어콘에서 나타나는 보다 젊은 1630 Ma와 1530 Ma의 연대, 그리고 흑운모 편마암의 둥근 저어콘의 최외각부에서 구해진 1450 Ma의 연대는 후기의 지질사건을 반영한 연대라고 생각된다. 흑운모 편마암의 Sm-Nd 석류석 연대가  $1605 \pm 39$  Ma(미발표자료)인 것으로 볼 때, 이러한 젊은 연대는 변성작용의 시기를 나타내는 것으로 생각된다.

연구 지역 화강 편마암과 흑운모 편마암의 저어콘 분석으로 얻어진 5단계의 연대는 영남육괴가 선캄브리아기 동안 최소 5차례 이상의 지질학적 사건을 겪었음을 지시한다. 그리고 흑운모 편마암의 둥근형 저어콘 중심부에서 구해진 연대들은 영남육괴가 시생대 기반암으로 이루어져 있으며, 남한의 선캄브리아기 기저가 적어도 30억 년 정도의 오래된 지각임을 나타내 주고 있다.

한편 저어콘에서 구해진 보다 젊은 연대들은 영남육괴의 여러 지역에서 보고 되어진 변성연대나 화성활동이 활발했던 시기의 연대와도 잘 대응이 된다. 영남육괴 남서부 구례 화강 편마암의  $2120 \pm 10$  Ma와  $2113 \pm 17$  Ma연대(Turek and Kim, 1995, 1996), 그리고 육괴 북서부 지역 단양 천동리 염리상 화강암의  $2160 \pm 150(2\sigma)$ Ma연대(권성택 외, 1995)는 김천지역 화강 편마암과 흑운모 편마암과는 약간의 차이는 있지만 비슷한 연대 범위내에 나타남을 알 수 있다. 그리고 분천 화강편마암의  $1920 \pm 56(1\sigma)$ Ma(박계현 외, 1993)와 지리산 지역 반상변정 편마암의  $1890 \pm 6 \sim 1945 \pm 5$  Ma(Turek and Kim, 1995, 1996)의 연대, 무주 지역 대리암의  $1990 \pm 100(2\sigma)$ Ma(박계현, 1996)의 연대들은 화성

작용 이후 수반된 변성작용의 연대로 생각되며, 이것은 흑운모 편마암의 길쭉한 저어콘의 연대와 일치하는 화강 편마암의 최소 관입연대로 생각되는 1970 Ma와도 거의 비슷하다.

## 결 론

연구지역인 중부 영남육괴 김천일대에 분포하는 화강 편마암에는 뚜렷한 암상의 차이를 보이는 흑운모 편마암이 포획 내지 잔류암의 형태로 산출되는 특성을 보인다. 이들에 대한 저어콘 화학연대 분석결과로 그 상관관계를 유추해 보면, 약 30억 년 정도의 시기에 흑운모 편마암의 원암이 생성된 후 여러 차례의 화성작용 혹은 변성작용을 겪었으며, 1970 ± 78(1σ)Ma에 화강암질 마그마가 관입하였다는 것을 알 수 있다. 화강 편마암이 만들어진 후의 변성작용 시기는, 두 편마암에서 나타나는 저어콘 화학연대의 가장 젊은 연대와 흑운모 편마암의 Sm-Nd 석류석 연대로 볼 때, 대략 15~16억년 정도에 변성작용을 함께 받은 것으로 판단된다. 그러나 분석된 시료의 수가 많지 않기 때문에 정확한 지각발달 시기를 결정하기 위해서는 보다 세밀한 연구를 통한 확인이 필요하다.

흑운모 편마암의 등근 저어콘에서 구해진 2954 ± 158(1σ)Ma, 2442 ± 58(1σ)Ma, 2219 ± 36(1σ)Ma, 1814 ± 77(1σ)Ma, 1450 Ma의 5단계 연대는 영남육괴가 선크브리아기 동안 최소 5차례 이상의 지질학적 사건을 겪었음을 지시하며, 영남육괴가 여러 차례의 지질학적 성장과정에 의해 형성되었음을 알 수 있다. 또한 이러한 연대들은 이미 영남육괴 전반에 걸쳐 보고되고 있는 여러 연대자료들과도 어느 정도 일치한다. 특히 육괴 남서부와 북서부 지역에서 얻어진 화강암질암의 21~22억 년의 관입연대와 광역변성작용이 수반되었던 19~20억 년의 연대와 잘 대비가 되고 있다. 이 연구로 얻어진 이상의 연대는 한반도 기저지각의 진화사와 영남육괴 생성 시점에서의 영남육괴와 경기 육괴 및 한중지괴와의 관계를 파악하는데 매우 중요한 자료가 될 것이다.

이 연구는 또한 1 μm 분석직경의 전자현미분석으로 저어콘에 대한 연대측정을 성공적으로 수행할 수 있음을 보여준다. 이는 다른 학자들이 일반적으로 사용하는 5~10 μm 분석직경의 화학연대 측정이나, 30 μm 분석직경의 SHRIMP 분석에 비해 공간분해능이 뛰어난 것이다. 비록, 전자현미분석기를 이용한 화학연대 측정 방법은 SHRIMP에 비해 큰 연대 오차를 갖지만, 흑운모 편마암의 등근 저어콘에서는 좁은 폭으로 누대가

발달하였기 때문에 큰 분석직경을 사용하였다면, 여러 시기의 지질학적 사건들을 구분할 수 없었을 것으로 판단된다. 따라서 이와 유사하게 복잡한 성장역사를 갖는 저어콘의 경우, 1 μm 분석직경을 적용하면 세밀한 지각발달사 연구에 많은 기여를 할 것으로 기대가 된다. 그러므로 전자현미분석기를 이용한 저어콘 화학연대 측정법은 이미 보고된 기존의 연대측정자료를 재확인 해보고, 다른 분석방법으로 얻어진 연대자료들과의 비교를 통해 보다 정확한 연대와 지질학적 사건의 시기에 대한 정보를 얻을 것으로 판단된다.

## 사 사

세심하게 논문을 심사해 주신 김용준 교수님과 정창식 박사님께 감사의 말씀을 드리며, 분석에 많은 도움을 주신 이석훈 박사님께도 깊은 고마움을 전합니다. 이 과정은 송용선에 대한 2001년도 부경대학교 연구년 교수지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김상욱, 이흥주, 1970, 한국지질도(1:50,000) 지례지질도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 15p.
- 김상욱, 양승영, 이윤종, 1989, 한국지질도(1:50,000) 김천도폭 보고서, 한국동력자원 연구소, 22p.
- 김정민, 정창식, 조문섭, 2000, 영남육괴 북동부 옥동 지역의 우백화강암에 대한 지구화학 및 동위원소 연구. 대한지질학회 2000년도 추계공동학술발표회 초록집. p.98.
- 권용완, 김형식, 오창환, 1997, 경기육괴 북동부지역에 분포하는 오대산편마암복합체의 다변성작용. 암석학회지, 6, 226-243.
- 권용완, 신의철, 오창환, 김형식, 강지훈, 1999, 풍기지역 소백산 편마암복합체의 백립암상 변성작용-북부 소백산육괴의 지각진화와 환경지질. 암석학회지, 8, 183-201.
- 권용완, 오창환, 김형식, 2001, 경기육괴 오대산편마암복합체의 U-Pb 저어콘연대와 그 의미. 한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 138-140.
- 권성택, 이진한, 박계현, 전은영, 1995, 단양 천동리 지역 옥천대/영남육괴의 접촉관계와 소위 화강암질 편마암의 Pb-Pb 연대. 암석학회지, 4, 144-152.
- 류호정, 2001, 영남육괴 남서부 및 북한 일부 지역 선크브리아 변성암의 암석학, 지구화학 및 지구연대학적 연구. 부경대학교 대학원 박사학위 논문, 257p.
- 박계현, 1996, 무주지역 대리암의 Pb-Pb 연대. 암석학회지, 5, 84-88.
- 박계현, 정창식, 1993, 선크브리아 경기육괴 중 대리암의 연대측정에 대한 예비연구. 암석학회지, 2, 130-138.
- 박계현, 정창식, 이광식, 장호완, 1993, 태백산지역의 고기 화강암 및 화강편마암류에 대한 납 동위원소 연구. 지질

- 학회지, 29, 387-395.
- 박계현, 김동연, 송용선, 2001, 지리산 지역 차노카이트와 함티탄철석 회장암질암의 Sm-Nd 광물연대 및 성인적 관계. 암석학회지, 10, 27-35.
- 박봉순, 이윤종, 1969, 한국지질도(1:50,000) 무풍지질도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 34p.
- 송용선, 1986, 소백산육괴 중앙부 선캠브리아기 변성암류에서의 흑운모-석류석 지온계. 이상만 교수 송수기념 논문집, 155-165.
- 송용선, 1987, 소백산 육괴 중앙부의 지질과 변성작용. 서울대학교 대학원 박사학위논문. 122P.
- 송용선, 1989, 중부소백산육괴 선캠브리아기 변성암류의 지질학적 연구. 광산지질학회지, 22, 293-300.
- 송용선, 1999, 소백산육괴 서남부 지리산 지역의 반상변정질 편마암에서 산출되는 백립암질 포획암. 암석학회지, 8, 34-45.
- 송용선, 류호정, 1994, 지리산일대 소백산편마암체의 다변성작용. 한국암석학회 제2차 학술발표회 요약집, 20.
- 송용선, 이상만, 1989, 소백산육괴 중앙부 선캠브리아기 변성암류의 암석학적 연구. 지질학회지, 25, 451-467.
- 윤석규, 박병권, 1968, 한국지질도(1:50,000) 설천지질도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 15p.
- 원종관, 김기태, 1969, 한국지질도(1:50,000) 상주지질도폭 및 설명서, 국립지질조사소, 34p.
- 윤현수, 1991, 상동지역 선캠브리아기 화강암류의 K-Ar 백운모 연령측정. 광산지질학회지, 24, 21-25.
- 이광진, 조문섭, 1992, 가평-청평 지역 경기육괴의 변성작용. 암석학회지, 1, 1-24.
- 이상만, 1980, 지리산(하동-산청)지역의 변성이질암의 변성작용에 관한 연구. 지질학회지, 16, 1-15.
- 이상만, 나기창, 이상현, 박매영, 이상원, 1981, 소백산육괴(동남부)의 변성암 복합체에 대한 변성작용에 관한 연구. 17, 169-188.
- 이상만, 김형식, 1984, 소위 울리층군 및 원남층군의 변성암석학적 연구-태백산 일대를 중심으로. 지질학회지, 20, 195-214.
- 이석훈, 2001, 전자현미분석기를 이용한 저어콘 및 모나자이트의 화학적 연대측정법. 암석학회지, 1, 179-189.
- 이호선, 2000, 소백산육괴 중부지역 김천일대에 분포하는 선캠브리아기 편마암류의 기원과 저어콘 CHIME연대. 부경대학교 대학원 석사학위논문. 101P.
- 조동룡, 홍승호, 최위찬, 이병주, 최범영, 1998, 고성-간성도폭 지질조사 보고서. 59p.
- 조문섭, 김종욱, 1993, 춘천-홍천 지역 용두리 편마암 복합체내 산출하는 납정석: 변성지구조적 의의. 암석학회지, 2, 1-8.
- 조문섭, 이기욱, 이승렬, Richard Stern, 1999, 남한에서 가장 오래된 지각물질의 나이. 한국 광물·암석학회 초록집, p.89.
- 조문섭, 2001, 이온현미분석기를 사용한 남서부 경기육괴 변성암류의 U-Pb 저어콘 연대; 남중국지괴와의 대비 가능성, 한국암석학회 공동학술발표회 논문집, 141-142.
- 조윤호, 조문섭, 이승렬, 1996, 청평-양평 지역에 분포하는 근경석 편마암의 백립암상 변성작용과 P-T 진화경로. 암석학회지, 5, 52-65.
- Andrij, K. Chebukin, Robert Frei, William Shotyk., 1997, An energy-dispersive miniprobe multielement analyzer (EMMA) for direct analysis of trace element and chemical age dating of single mineral grains. Chemical Geology, 135, 75-87.
- Brouand, M., Banzet, G. and Barbey, P., 1990, Zircon behavior during crustal anatexis-Evidence from the Tibetan Slab migmatites (Nepal). Jour. Volcanol. Geotherm. Res., 44, 143-162.
- Choo, S.H. and Kim, S.J., 1985, A study of Rb-Sr age determination on the Yongnam Massif(I): Pyeonghae, Burcheon and Kimchon granite gneisses. Report 85-24, Korea Institute of Energy and Resources, Seoul., 7-39.
- Hanchar, J.M. and Miller, C.F., 1993, Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories. Chemical Geology, 110, 1-13.
- Kim, C.B., Choi, S.J., Suzuki, K., Adachi, M., Obayashi, T., and Yu, K.M., 1997, Province of Cretaceous Sandstones in the Southeastern Youngdong Basin, Korea: CHIME geochronology of detrital Monazites. Geosciences Jour., 1, 37-49.
- Kim, C.B., Turek A., Chang, H.W., Park, Y.S., Ahn, K.S., 1999, U-Pb zircon ages for Precambrian and Mesozoic plutonic rocks in the Seoul-Cheongju- Chooncheon area, Gyeonggi massif, Korea. Geochemical Jour., 31, 379-397.
- Lee, S.M., Kim, H.S. and Oh, I.S., 1986, Metamorphic Petrology of Precambrian Gneisses in Samcheok-Jukyeon Area. Jour. Geol. Soc. Korea, 22, 257-277.
- Lee, S.G., Shimizu, H., Masuda, A., Song, Y.S., 1992, Crustal evolution of the Precambrian basement in the Korean Peninsula. Jour. Petrol. Soc. Korea., 1, 124-131.
- Lee, S.R., Cho, M.S., Cheong, C.S. and Park, K.H., 1997, An early Proterozoic Sm-Nd age of mafic granulite from the Hwacheon area, South Korea. Geoscience Jour., 1, 136-142.
- Montel, J.M., Foret S., Veschamber M., Nicollet C., 1996, Electron microprobe dating of monazite. Chemical Geol., 131, 37-53.
- Montel, J.M., Kornprobst J., and Vielzeuf D., 2000, Preservation of old U-Th-Pb age in shielded menazite: example from the beni Bousera Hercynian Kinzigites(Morocco). Jour. Metamorphic Geology, 18, 335-343.
- Robb, L.J., Armstrong R.A., and waters D.J., 1999, The history of Granulite-facies metamorphism and crustal growth from single zircon U-Pb geochronology: Namaquanland, South Africa. Jour. Petrology, 40, 1747-1770.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1991a, The chemical Th-U-total Pb isochron ages of zircon and monazite from the gray Granite of the Hida terrane, Japan. Jour. Earth Science, Nagoya Univ., 38, 11-38.

- Suzuki, K. and Adachi, M., 1991b, Precambrian province and silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the Th-U-total Pb chemical isochron ages of monazite, zircon and xenotime. *Geochemical Jour.*, 25, 357-376.
- Suzuki, K. and Adachi, M., 1994, Middle Precambrian detrital monazite and zircon from the Hida gneiss on Oki-Dogo Island, Japan: their origin and implication for the correlation basement gneiss of Southwest Japan and Korea. *Tectonophysics*, 235, 277-292.
- Turek, A. and Kim, C.B., 1995, U-Pb Zircon ages of Mesozoic plutons in the Damyang-Geochang area Ryongnam massif, Korea. *Geochemical Jour.*, 29, 243-258.
- Turek, A. and Kim, C.B., 1996, U-Pb Zircon ages for Precambrian rocks in Southwestern Ryeongnam and Southwestern Gyeonggi massifs, Korea. *Geochemical Jour.*, 30, 231-249.
- Vavra, G., 1990, On zircon kinematics of zircon growth and its petrogenetic significance: a cathodoluminescence study. *Contrib. Mineral. Petrology*, 106, 90-99.

---

(2002년 11월 2일 접수, 2002년 12월 7일 채택)